



ОСОБЕННОСТИ КОНЦЕНТРАЦИОННОГО ВЛИЯНИЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО НАНОКРЕМНЕЗЕМА ПРИ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКЕ СЕМЯН РАСТЕНИЙ НА ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГИИ ПРОРАСТАНИЯ И ВСХОЖЕСТИ В ЛАБОРАТОРНОМ ТЕМНОВОМ ПРОРАЩИВАНИИ

PECULIARITIES OF THE CONCENTRATION EFFECT OF HYDROTHERMAL NANOSILICA IN THE PRE-SOWING TREATMENT OF PLANT SEEDS UPON INDICATORS OF THE GERMINATIVE ENERGY AND GERMINATING ABILITY IN LABORATORY DARK GROWTH

В.Н.Зеленков^{1,2,3}, к.х.н., д.с.-х.н., проф., гл. науч. сотр., (ORCID: 0000-0001-5481-2723), В.В.Латушкин¹, к.с.-х.н., вед. науч. сотр., (ORCID: 0000-0003-1406-8965), В.В.Потапов⁴, д.т.н., проф., гл. науч. сотр., (ORCID: 0000-0001-6959-3324), В.В.Карпачев⁵, д.с.-х.н., проф., член-корр. РАН, гл. науч. сотр., (ORCID: 0000-0002-1141-2065), В.М.Косолапов⁶, д.с.-х.н., проф., акад. РАН, директор, (ORCID: 0000-0002-3480-3464), В.Т.Синеговская⁷, д.с.-х.н., проф., акад. РАН, гл. науч. сотр., (ORCID: 0000-0002-9048-3119), М.И.Иванова³, д.с.-х.н., проф. РАН, гл. науч. сотр., (ORCID: 0000-0001-7326-2157), А.А.Лапин², к.х.н, доц., вед. науч. сотр., (ORCID: 0000-0001-9142-0403), П.А.Верник¹, директор, (ORCID: 0000-0001-5850-7654) /zelenkov-raen@mail.ru

V.N.Zelenkov^{1,2,3}, Doct. of Sc. (Agriculture), Prof., Senior Researcher, V.V.Latushkin¹, Cand. of Sc. (Agriculture), Leading Researcher, V.V.Potapov⁴, Doct. of Sc. (Technical), Prof., Chief Researcher, V.V.Karpachov⁵, Doct. of Sc. (Agriculture), Prof., Corresponding Member of RAS, Senior Researcher, V.M.Kosolapov⁶, Doct. of Sc. (Agriculture), Prof., Academician of RAS, Director, V.T.Sinegovskaya⁷, Doct. of Sc. (Agriculture), Prof., Academician of RAS, Senior Researcher, M.I.Ivanova³, Doct. of Sc. (Agriculture), Prof., Senior Researcher, A.A.Lapin², Cand. of Sc. (Agriculture), Docent, Leading Researcher, P.A.Vernik¹, Institute Director

DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.6.346.358

Получено: 19.10.2020 г.

Исследование посвящено изучению влияния гидротермального нанокремнезема разных концентраций (0,05; 0,01; 0,005; 0,001 и 0,0005%) на прорастание семян 11 сельскохозяйственных растений (15 генотипов). Установлено четыре типа реакции прорастающих семян на воздействие

¹ Автономная некоммерческая организация "Институт стратегий развития", Москва, Россия / Independent NPO Institute for Socio-Economic Strategies and Development Technologies (Institute for Development Strategies), Moscow, Russia.

² ФГБНУ "Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений", Москва, Россия / All-Russian Scientific Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants, Moscow, Russia.

³ Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства – филиал ФГБНУ "Федеральный научный центр овощеводства" (ВНИО – филиал ФГБНУ ФНЦО), Московская область, Раменский район, д. Верея, Россия / All-Russian Scientific Research Institute of Vegetable Growing – the branch of FSBSI "Federal Scientific Center of Vegetable Growing", Moscow region, Russia.

⁴ ФГБУН Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия / Far Eastern Branch of the RAS, FSBSI "Research Geotechnological Center".

⁵ ФГБНУ "Всероссийский научно-исследовательский институт рапса", г. Липецк, Россия / All-Russian Research Institute of Rapeseed", Lipetsk, Russia.

⁶ ФГБНУ "Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р.Вильямса", 141055, Московская обл., г. Лобня, Научный городок, корпус 1 / V.R.Williams Federal Research Center for Feed Production and Agroecology, Moscow region, Russia.

⁷ ФГБНУ "Всероссийский научно-исследовательский институт сои", г. Благовещенск, Россия / All-Russian Research Institute of Soybean, Blagoveshchensk, Russia.



наночастиц SiO_2 в указанном диапазоне концентраций. Данные закономерности характерны как для показателя "энергия прорастания семян", так и для показателя "всхожесть семян", однако они не всегда совпадают для одной и той же культуры и сорта. Во многих случаях гидротермальный нанокремнезем способствует повышению энергии прорастания семян (на ранней стадии прорастания) в большей степени, чем всхожести.

The research is devoted to the study of the influence of hydrothermal nanosilica of different concentrations (0.05%, 0.01%, 0.005%, 0.001% and 0.0005%) on seed germination of 11 agricultural plants (15 genotypes). Four types of reaction of germinating seeds to the effect of SiO_2 nanoparticles in the specified concentration range have been established. These patterns are typical for both the "seed germination energy" and "seed rising ability" indicator, but they do not always coincide for the same crop and variety. In many cases, hydrothermal nanosilica contributes to an increase in seed germination energy (at an early stage of germination) to a greater extent than rising ability.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений улучшения прорастания семян в условиях открытого и защищенного грунта является использование регуляторов роста растений, в частности, наноразмерных форм кремнезема (ГНК). Направление по выделению нанодисперсного кремнезема гидротермального происхождения активно развивается в России последние 20 лет [1-3].

В качестве сырья для получения этого материала используются глубинные воды из скважин гидротермальной электростанции Мутновской ГеоЭС (Камчатка). Использование наночастиц кремнезема из природных геотермальных вод открывает перспективы широкомасштабного применения новых природных ресурсов для развития нанотехнологий при

создании инновационных продуктов. Существенным моментом для таких перспектив являются выявленные в результате многолетних исследований авторов биологически активные свойства ГНК, способствующие повышению продуктивности сельскохозяйственных растений и животных [4-12]. Важным аспектом является экологическая безопасность использования этого природного наноматериала [12].

Кремнезем образуется в гидротермальном растворе из молекул ортокремниевой кислоты, находящейся в недрах гидротермальных месторождений. После выхода раствора на поверхность его температура снижается, и он становится пересыщенным относительно растворимости аморфного кремнезема, что запускает нуклеацию и поликонденсацию молекул кремнекислоты. В результате в растворе

INTRODUCTION

One of the promising directions to improve seed germination in open and protected ground is the use of plant growth regulators, in particular, nanosized forms of silica (HNS). The direction dealing with isolation of nanodispersed silica of hydrothermal origin has been actively developing in Russia for the last 20 years [1-3].

Deep waters from the wells of the Mutnovskaya GeoPP (Kamchatka) hydrothermal power station are used as raw materials for obtaining HNS. The use of silica nanoparticles obtained from natural geothermal waters opens up prospects

for large-scale use of the new natural resources for the development of nanotechnologies when creating innovative products. An essential point for such prospects are the HNS biologically active properties revealed as a result of many years of research by the authors, which contribute to an increase in the productivity of agricultural plants and animals [4-12]. The environmental safety of using this natural nanomaterial presents an important aspect [12].

Silica is formed in a hydrothermal solution from orthosilicic acid molecules found in the depths of hydrothermal deposits. After the

solution reaches the surface its temperature decreases and it becomes supersaturated with respect to solubility of amorphous silica, which triggers nucleation and polycondensation of silicic acid molecules. As a result, colloidal particles of hydrated silica $n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ are formed in the solution. Due to dissociation of the surface silanol groups of SiOH and elimination of the H^+ proton, the surface of particles acquires a negative electric charge. The electrostatic repulsion forces prevent coagulation of particles and determine the stability of colloidal silica in a hydrothermal solution. As a result, spherical silica nanoparticles of



формируются коллоидные частицы гидратированного кремнезема $n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$. Из-за диссоциации поверхностных силанольных групп SiOH и отщепления протона H^+ поверхность частиц приобретает отрицательный электрический заряд. Силы электростатического отталкивания препятствуют коагуляции частиц и обуславливают устойчивость коллоидного кремнезема в гидротермальном растворе. В результате формируются сферические наночастицы кремнезема радиусами 5–100 нм [1–3]. Содержание SiO_2 в золях кремнезема при использовании ультрафильтрационных мембран было доведено авторами статьи до 100–600 г/дм³. Плотность золь была в пределах 999–1325 г/дм³, динамическая вязкость – 1–150 мПа·с, радиусы частиц кремнезема – 5–135 нм, дзета-потенциал частиц – (–32,4...–42,5) мВ. Ультрафильтрация обеспечивает достаточно низкое содержание примесей и стабильность водных золь кремнезема вплоть до самых высоких содержаний SiO_2 , которых нам удалось достичь в технологических экспериментах – до 600 г/дм³. Это соответствует степени концентрирования 1500 крат в сравнении с содержанием кремнезема в исходном гидротермальном растворе и открывает перспективы использования новых природных минеральных ресурсов на практике.

Применение ГНК в растениеводстве и биотехнологии может рассматриваться как одно из перспективных экологически чистых технологических направлений по природоподобным технологиям использования минеральных ресурсов

для растениеводства, ветеринарии и биотехнологий [4–12].

Разработка физико-химических основ биотехнологии предпосевной обработки семян растений наночастицами различной природы необходима для понимания роли генетического (сортового) и эпигенетических факторов химического и физико-химического состава как оболочки семян, так и расположения резервных питательных веществ внутри семени, активация и использование которых начинается при увлажнении семян с созданием условий для прорастания как в полевых условиях, так и в лабораторных, при включении в систему прорастающих семян нового фактора воздействия – наночастиц гидротермального кремнезема [13]. В связи с активным развитием бионанотехнологии в приложении к сельскохозяйственной науке последние 10 лет взаимодействие растений с наночастицами различной природы на разных этапах онтогенеза активно исследуется учеными разных стран [14–21].

Первым этапом вегетации растений является их прорастание в среде обитания, условия которой можно моделировать в лаборатории для изучения лимитирующих факторов продуктивности растений [14]. Исследования в этом направлении в условиях создания однородности моделирования процессов взаимодействия наночастиц с различными по характеристикам семенами различных видов растений позволяют систематизировать экспериментальные данные по однородности проявления отклика прорастиваемых семян

5–100 nm radii are formed [1–3]. The content of SiO_2 in silica sols using ultrafiltration membranes was brought by the authors of the article to 100–600 g / dm³. The density of the sols was in the range of 999–1,325 g / dm³, the dynamic viscosity was 1–150 mPa·s, the radii of the silica particles were 5–135 nm, and the zeta potential of the particles was (–32.4...–42.5) mV. Ultrafiltration provides for a fairly low content of impurities and stability of aqueous silica sols up to the highest SiO_2 contents that we have been able to achieve in technological experiments – up to 600 g / dm³. This corresponds to a concentration of 1,500

times compared to the silica content in the initial hydrothermal solution and opens up prospects for practical use of the new natural mineral resources.

Application of the HNS in crop production and biotechnology can be considered as one of the promising environmentally friendly technological directions for nature-like technologies using mineral resources for crop production, veterinary medicine and biotechnologies [4–12].

Development of the physicochemical basics of biotechnology for the pre-sowing treatment of plant seeds with nanoparticles of various nature is necessary to understand

the role of the genetic (varietal) and epigenetic factors of the chemical and physicochemical composition of both the seed coat and the location of reserve nutrients inside the seed, which activation and use begins with moistening seeds and creation of the conditions for germination both in the field and in the laboratory, including a new factor of influence in the system of germinating seeds – nanoparticles of hydrothermal silica [13]. In connection with the active development of bionanotechnology in the agricultural science, the interaction of plants with nanoparticles of various natures at different stages of ontogenesis has

в количественных параметрах энергии прорастания и всхожести, что для разных видов сельскохозяйственных растений стандартизовано по условиям оценки этих параметров в нормативных документах на уровне государственных стандартов (ГОСТ) или технических условий для случаев малоиспользуемых на практике или новых видов интродуцируемых растений в новых климатических условиях на территории России.

Конечная цель любых системных научных исследований – применение на практике новых знаний и методологии технологических приемов их применения в сортовых технологиях предпосевной обработки в растениеводстве открытого и защищенного грунта, а также получение нового вида пищевой продукции – пророщенных семян и микрозелени с повышенной биологической ценностью по содержанию физиологически активных биохимических компонентов как продуктов ферментативных процессов гетеротрофного питания семян в темноте или при естественном, солнечном или искусственном светодиодном освещении, широко используемом в последние годы на практике при моделировании среды обитания растений и ее изменений в агробиотехносистемах [14].

Целью настоящей работы являлась скрининговая экспериментальная оценка отклика семян разных сельскохозяйственных культур на их предпосевную обработку наночастицами кремнезема гидротермального происхождения в единой шкале концентраций наночастиц при темновом лабораторном проращивании.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В соответствии с целью экспериментальной работы изучалось прорастание семян 11 сельскохозяйственных культур разного назначения (овощных, масличных, кормовых, лекарственных), отличающихся по биологическим особенностям, генетической природе, химическому и физико-химическому составу и строению семян и их кожуры. Всего изучено 15 генотипов, включая разные виды, сорта и гибриды.

Проращивание семян проводили в темноте согласно ГОСТ 12038-84. "Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести" и ГОСТ 22617.2-94. "Семена сахарной свеклы. Методы определения всхожести, однородности и доброкачественности" с изменениями: вместо фильтровальной бумаги использовали подложку из минеральной ваты. Проращивание проводили в камере синерготрона – экспериментальном образце модели ИСР 1.01 (разработка АНО "Институт стратегий развития"). Полив осуществляли дистиллированной водой по мере подсыхания подложки. Температура проращивания 23–24 °С, повторность трехкратная. Предпосевную обработку наночастицами гидротермального кремнезема проводили путем замачивания семян в течение 2 ч в дистиллированной воде (контроль) и водных золях гидротермального нанокремнезема (ГНК) разных концентраций (0,05; 0,01; 0,005; 0,001 и 0,0005%). Исключением являлись семена сои, где замачивание проводили в течение 15 мин. Предварительными экспериментами было установлено, что дальнейшее увеличение продолжительности замачивания не приводит к увеличению

been actively studied by scientists from different countries [14–21].

The first stage of plant vegetation is their germination in the habitat such conditions can be simulated in the laboratory to study the limiting factors of plant productivity [14]. Research in this direction in the conditions of creating uniformity of modeling the interaction processes of nanoparticles with seeds of different characteristics of various plant species makes it possible to classify the experimental data according to uniformity of the germinated seeds response in quantitative parameters of germinative energy and germinating ability,

which has been standardized for different types of agricultural plants according to the conditions for evaluating these parameters in regulatory documents at the level of state standards (GOST) or technical specifications for the cases little used in practice or for the new species of the plants introduced in new climatic conditions in the territory of Russia.

The ultimate goal of any systemic scientific research is the practical application of new knowledge and methodology of techniques in varietal technologies of pre-sowing treatment in crop production of the open and protected ground, as well as obtaining a new type of

food products – germinated seeds and microgreens with increased biological value in terms of the content of physiologically active biochemical components as products of enzymatic processes of heterotrophic seed nutrition in the dark or under natural solar or artificial LED illumination, which has been widely used in recent years in practice when modeling the plant habitat and its changes in agrobiotechnological systems [14].

The purpose of this work was a screening experimental assessment of the seeds response of different agricultural crops to their pre-sowing treatment with nanoparticles of

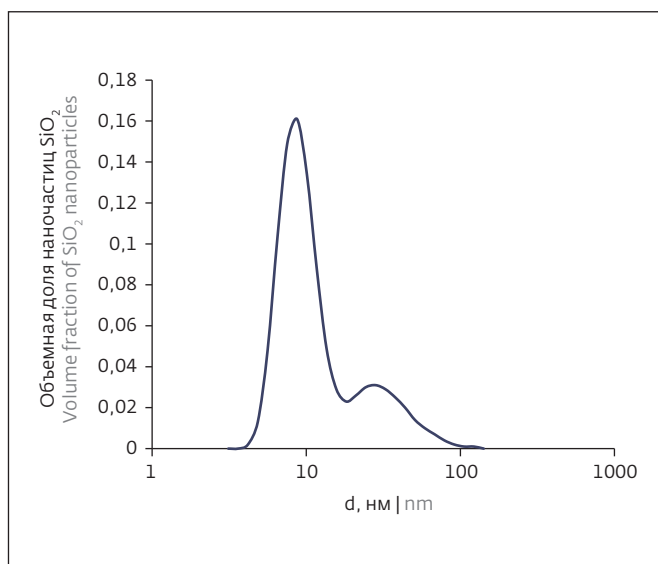


Рис.1. Распределение частиц ГНК по размерам
Fig.1. Size distribution of HNS particles

количества поглощенного семенами водного раствора с препаратом, а целостность семян сои нарушается и они легко травмируются при посеве.

В работе для всех экспериментов использовали исходный водный золь ГНК с концентрацией наночастиц SiO_2 37,5 масс. %, полученный методами ультрафильтрации в НИГТЦ ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский) в 2018 году из гидротермального раствора скважин Мутновской геотермальной электростанции по методике, приведенной в работах [1-3].

Рабочий водный золь ГНК концентрации 2,5% готовили заранее разбавлением дистиллированной водой из исходного водного 37,5%-ного концентрата ГНК.

Перед началом каждого эксперимента с семенами конкретной сельскохозяйственной культуры из 2,5%-ного рабочего водного золя ГНК готовили свежие водные золи нанокремнезема на дистиллированной воде указанных концентраций для опытов. Приготовленные водные золи ГНК разных концентраций использовали в экспериментах на предпосевную обработку семян сразу после приготовления в течение не более 30 мин.

На рис.1 показано распределение наночастиц кремнезема, полученное с помощью метода динамического светорассеяния. Первый пик соответствует максимальному распределению наночастиц, второй пик обусловлен образованием агрегатов наночастиц в дисперсной наносистеме. Модальный гидродинамический диаметр частиц ГНК исходного концентрата и его 2,5%-ного золя, используемого в работе, составляет 9 нм (измерения проведены в НИЦ "Курчатовский институт").

Согласно ГОСТ 12038-84 энергию прорастания и всхожесть семян определяли в следующие сроки: клевер луговой – на 3 сутки (энергия прорастания) и 7 сутки (всхожесть), кориандр – на 6 и 15 сутки соответственно, люцерна изменчивая – на 4 и 7 сутки, овсяница луговая и фестулолиум – на 5 и 10 сутки, полевица – на 7 и 14, рапс – на 3 и 7, редис – на 3 и 6, свекла столовая – на 5 и 10, соя – на 3 и 7 сутки соот-

hydrothermal silica in a single scale of nanoparticle concentrations during dark laboratory germination.

MATERIALS AND RESEARCH METHODS

In accordance with the experimental work purpose the germination of 11 agricultural crop seeds (vegetables, oilseeds, fodder, medicinal), differing in biological characteristics, genetic nature, chemical and physicochemical composition and structure of seeds and their peels have been studied for various purposes. In total, 15 genotypes have been studied, including different species, varieties and hybrids.

Germination of seeds was carried out in the dark according to GOST 12038-84 "Seeds of agricultural crops. Methods for determining germination" and GOST 22617.2-94 "Sugar beet seeds. Methods for determining germination, mono-germity and good quality" as amended: a mineral wool substrate was used instead of filter paper. Germination was carried out in a synergotron chamber – an experimental model of the IDS 1.01 model (developed by the Institute for Development Strategies). Watering was carried out with distilled water as the substrate dried up. Germination temperature was

23–24 °C and threefold repetition was applied. Pre-sowing treatment with hydrothermal silica nanoparticles was carried out by soaking the seeds for 2 hours in distilled water (control) and in aqueous sols of hydrothermal nanosilica (HNS) of various concentrations (0.05%, 0.01%, 0.005%, 0.001%, and 0.0005%). Soybean seeds were an exception where soaking was carried out for 15 minutes. In the course of preliminary experiments it was found that a further increase in duration of soaking does not lead to an increase in the amount of the aqueous solution with the preparation absorbed by the seeds, while the integrity



ветственно. Семена свеклы сахарной проращивали согласно ГОСТ 22617.2-94 в течение 4 суток для определения энергии прорастания и 10 суток – всхожести. По новой кормовой культуре, нугу абиссинскому, ГОСТ на прорастание еще не разработан, поэтому посевные свойства в эксперименте определяли по аналогии с другими быстро всхожими семенами – на 3 и 7 сутки.

Так как целью настоящей работы являлось сравнение эффектов гидротермального нанокремнезема на 11 сельскохозяйственных культурах, то все данные по посевным свойствам семян пересчитаны в относительные величины – изменение (прибавка) энергии прорастания и всхожести в % по отношению к контролю по данной культуре (т.е. варианту без обработки ГНК). Таким образом, становится возможным сопоставление, анализ полученных в эксперименте данных по разным культурам.

Всхожесть использованных в эксперименте исходных семян (контроль) составляла по разным культурам от 51,4% (клевер, сорт Марс) до 98,1% (редис, сорт Юбилейный), в значительно большем диапазоне изменялась энергия прорастания (табл.1). Все данные, представленные в разделе "Результаты и их обсуждение", приводятся в сравнении с указанным контролем в относительных единицах (в %).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Применение наноразмерного кремнезема при проращивании семян в эксперименте позволило увеличить энергию прорастания семян максимально на 10,5% по сравнению с контролем (соя, сорт Алена). В то же время по ряду культур прирост энергии прорастания семян не превышал 1% (рапс, сорта Антарес и Ратник; люцерна, сорт Селена, клевер луговой, сорта Марс и Павловский). Небольшой уровень повышения всхожести характерен для всех изученных сортов рапса и клевера. В то же время повышение всхожести семян люцерны (сорт Селена) составило 0,6%, а люцерны (сорт Пастбищная 88) – 1,2%.

Всхожесть семян при применении ГНК увеличивалась максимально на 8,3% по сравнению с контролем (свекла сахарная, гибрид Смена F1). Однако по тем же культурам, у которых отмечался минимальный прирост энергии прорастания семян, прирост всхожести также был минимален и не превышал 1% (рапс, сорта Антарес и Ратник; люцерна, сорт Селена; клевер луговой, сорта Марс и Павловский). В то же время повышение всхожести семян люцерны (сорт Селена) составило 0,4%,

Таблица 1. Энергия прорастания и всхожесть семян в контрольном варианте (без применения ГНК), %

Table 1. Germinative energy and germinating ability in the control variant (without the use of HNS), %

Культура, сорт Crop, variety	Энергия прорастания, % Germination energy, %	Всхожесть, % Rising ability, %
Овсяница луговая, сорт Кварта Meadow fescue, Kwart	19,0	76,0
Фестулолиум, сорт Аллегро Festulolium, Allegro	26,0	78,0
Свекла сахарная, гибрид Смена F1 Sugar beet, hybrid Smena F1	26,8	76,3
Клевер луговой, сорт Павловский 16 Meadow clover, Pavlovsky 16	26,9	59,8
Клевер луговой, сорт Марс Clover, Mars	33,3	51,4
Соя, сорт Алена Soy, Alena	32,2	80,3
Люцерна изменчивая, сорт Селена Alfalfa variable, Selena	41,7	77,8
Люцерна изменчивая, сорт Пастбищная 88 Alfalfa changeable, Pastbischnaya 88	44,9	80,7
Кориандр, сорт Янтарь Coriander, Yantar	50,2	93,2
Нугу Абиссинский, сорт Липчанин Noug Abyssinsky, Lipchanin	62,1	93,0
Свекла столовая, сорт Деметра Beetroot, Demeter	79,7	96,8
Полевица гигантская, сорт ВИК-2 Giant bent, VIK-2	82,0	84,0
Рапс, сорт Ратник Rape, Ratnik	91,4	92,2
Рапс, сорт Антарес Rape, Antares	92,4	93,3
Редис, сорт Юбилейный Radish, Yubileiny	94,6	98,1

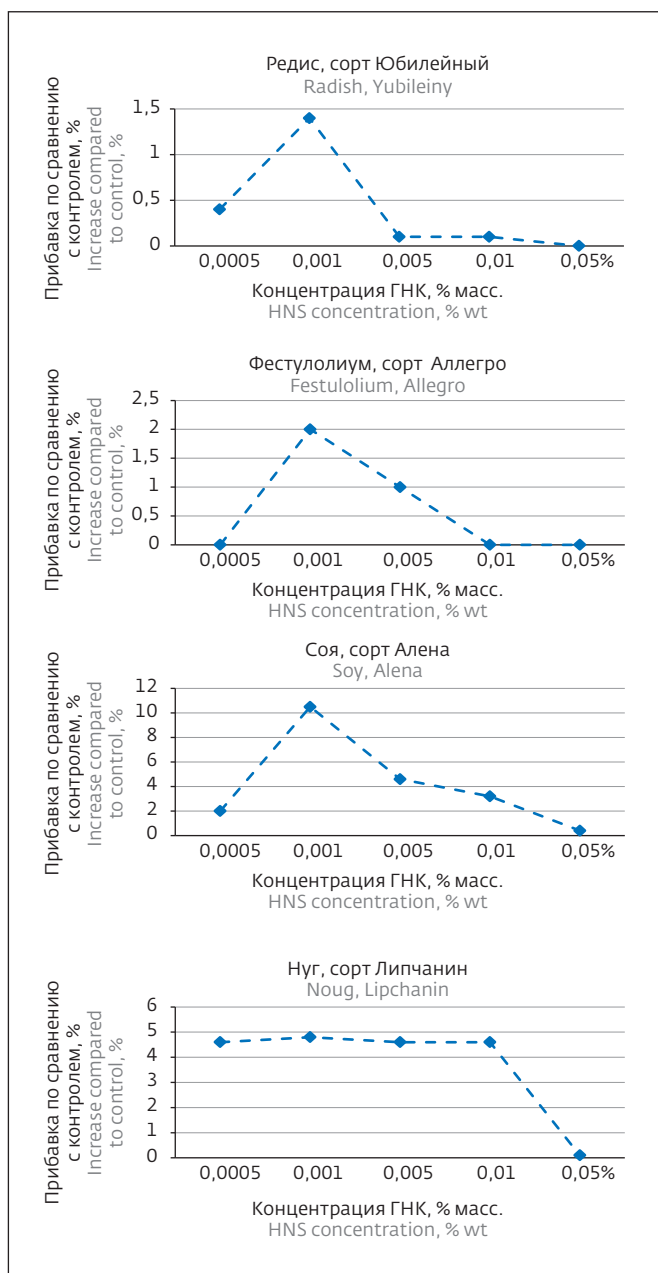


Рис.2. Влияние концентрации ГНК на энергию прорастания семян редиса, сои, фестулолиума и нуга Абиссинского
 Fig.2. Effect of HNS concentration on the germinative energy of radish, soybeans, festulolium and Abyssinian noug seeds

а люцерны (сорт Пастбищная 88) – 1,3%. У кориандра (сорт Янтарь) прибавка энергии прорастания составила максимум до 5,1%, а прибавка всхожести – до 0,7%.

Существенное повышение энергии прорастания семян под влиянием обработки наночастицами кремнезема (в большей степени, чем всхожести) в эксперименте проявилось, кроме кориандра, также у ряда других культур, особенно у нуга

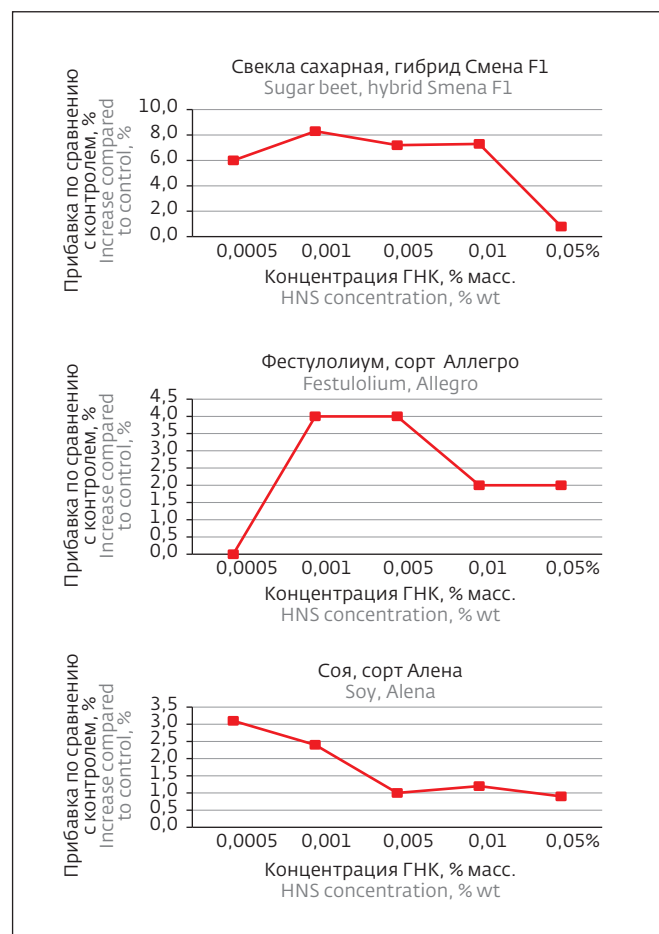


Рис.3. Влияние концентрации ГНК на всхожесть семян свеклы сахарной, фестулолиума и сои
 Fig.3. Influence of HNS concentration on the germinating ability of sugar beet, festulolium and soybeans

Абиссинского (сорт Липчанин) и сои (сорт Алена). В то же время ГНК может стимулировать и большее повышение показателя всхожести, чем показателя энергии прорастания (пример – свекла сахарная, гибрид Смена F1; фестулолиум, сорт Аллегро).

Таким образом, генетический фактор играет существенную роль в формировании отзывчивости растений на применение гидротермального нанокремнезема при проращивании семян в темновом режиме.

Скрининг семян разных культур и сортов по реакции показателей энергии и всхожести на обработку ГНК разных концентраций (0,05; 0,01; 0,005; 0,001 и 0005%) показал существование нескольких типов таких реакций. На рис. 2-9 представлены четыре обобщенные группы культур, различающихся по геометрической форме отклика-отображения на графике зависимости показателя энергии (всхожести) к контролю в зависимости

Абиссинского (сорт Липчанин) и сои (сорт Алена). В то же время ГНК может стимулировать и большее повышение показателя всхожести, чем показателя энергии прорастания (пример – свекла сахарная, гибрид Смена F1; фестулолиум, сорт Аллегро).

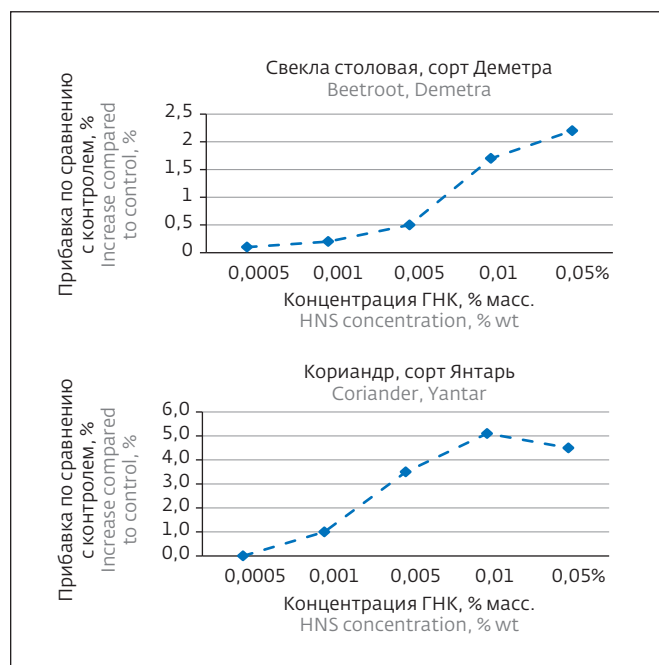


Рис.4. Влияние концентрации ГНК на энергию прорастания семян свеклы столовой и кориандра

Fig.4. Influence of HNS concentration on germinative energy of table beet and coriander seeds

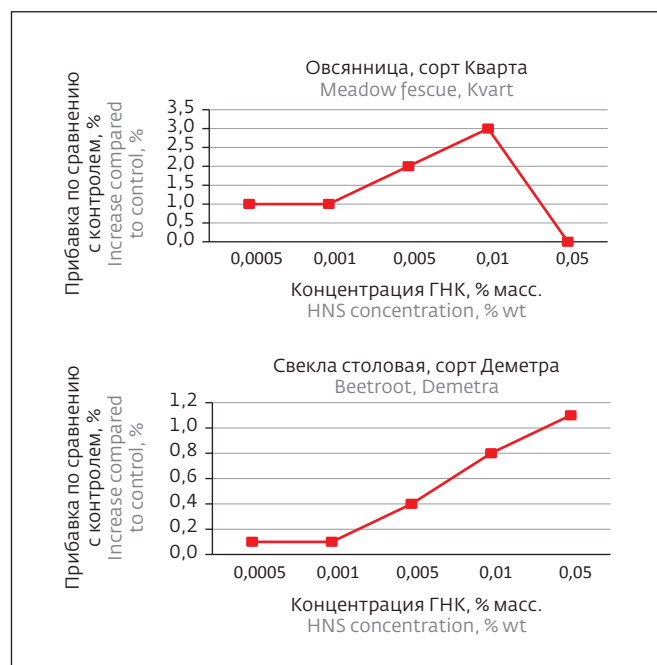


Рис.5. Влияние концентрации ГНК на всхожесть семян свеклы столовой и овсяницы луговой

Fig.5. Influence of HNS concentration on the germinating ability of table beet and meadow fescue

от концентрации ГНК в водном золе при предпосевной обработке семян. Включение разных растений в группы проводили путем визуализации данных диаграмм, отражающих формы отклика семян соответствующих культур. Для анализа выбраны культуры и сорта, у которых прибавка энергии

прорастания и всхожести семян при применении ГНК превышала величину 1%. Отметим, что выделенные четыре типа реакций прослеживаются как при анализе энергии прорастания, так и всхожести семян, однако полного совпадения не обнаруживается. Вероятно это связано с тем, что совокупность

of soybean seeds is disturbed and they are easily injured during sowing.

For all experiments, we used the initial aqueous HNS sol of 37.5 wt. % concentration of SiO₂ nanoparticles obtained by ultrafiltration methods at the Far Eastern Branch of the RAS, FSBSI "Research Geotechnological Center" (Petropavlovsk-Kamchatsky) in 2018 from the hydrothermal solution of the Mutnovskaya hydrothermal power plant wells according to the method described in [1-3].

A working aqueous sol of the HNS of 2.5% concentration was

prepared in advance from the initial aqueous 37.5% HNS concentrate by diluting it with distilled water.

Before the start of each experiment with seeds of a specific agricultural crop, fresh aqueous sols of nanosilica were prepared out of a 2.5% working aqueous sol of HNS using distilled water of the indicated concentrations. The prepared aqueous HNS sols of various concentrations were used in experiments on pre-sowing treatment of seeds immediately after preparation for no more than 30 minutes.

Figure 1 shows a distribution of silica nanoparticles obtained using the dynamic light scattering

method. The first peak corresponds to the maximum distribution of nanoparticles, the second peak is due to the formation of aggregates of nanoparticles in a dispersed nanosystem. The modal hydrodynamic diameter of the HNS particles of the initial concentrate and its 2.5% sol used in the work is 9 nm (measurements were carried out at the National Research Center "Kurchatov Institute").

According to GOST 12038-84, the germinative energy and seed germinating ability were determined in the following periods: meadow clover – on the 3rd day (germinative energy) and 7th

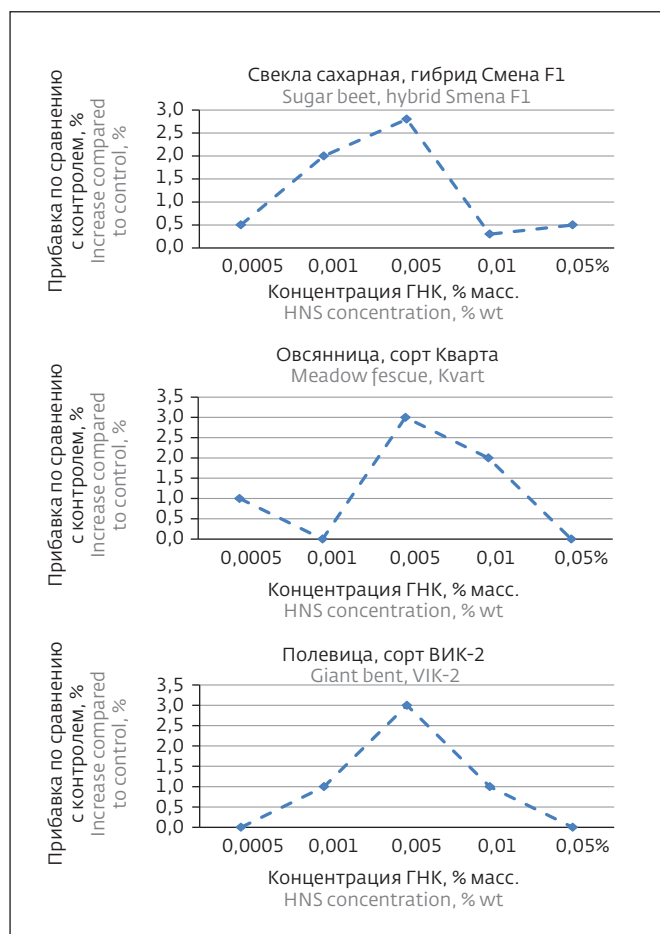


Рис.6. Влияние концентрации ГНК на энергию прорастания семян свеклы сахарной, полевицы, овсяницы луговой
Fig.6. Influence of HNS concentration on germinative energy of sugar beet, bent grass and meadow fescue seeds

day (germinating ability), coriander – on the 6th and 15th days, respectively, alfalfa changeable – on the 4th and 7th days, meadow fescue and festulolium – on days 5 and 10, bent grass – 7 and 14, rapeseed – 3 and 7, radishes – on 3 and 6, table beets – 5 and 10, soybeans – 3 and 7 days, respectively. Seeds of sugar beet were germinated according to GOST 22617.2-94 for 4 days to determine the germinative energy and for 10 days – to determine the germinating ability. As regards the new fodder culture of the Abyssinian nougat, the GOST for germinating ability has not yet been developed for germination,

therefore, the sowing properties in the experiment were determined by analogy with other rapidly germinating seeds – on days 3 and 7.

Since the purpose of this work was to compare the effects of hydrothermal nanosilica on 11 agricultural crops, all data on the sowing properties of seeds were recalculated into relative values – the change (increase) in germinative energy and germinating ability in % relative to the control seeds of a particular crop (i.e. without HNS processing). Thus, it becomes possible to compare and analyze the data obtained in the experiment for different crops.

проявления биохимических (специфичность и активность ферментов), биофизических (структура семени), химических (химический состав питательных веществ семени) и физиологических факторов (особенности прорастания) формируют характерные признаки "энергия прорастания" и "всхожесть семян" на диаграммах, что придает дополнительные существенные отличия (меняют ранжировку значимости факторов) наряду со специфичностью геномов. Однако и у культур с прибавкой показателей энергия прорастания и всхожести менее 1% отмечались сходные тенденции по типу отклика реакции (по типу группы 1 – по всхожести: у рапса, сорт Антарес; группы 2 – по всхожести: у рапса, сорт Ратник; клевера, сорт Марс; кориандра, сорт Янтарь; группы 3 – по энергии прорастания: клевер, сорт Марс; по всхожести: у клевера, сорт Павловский; группы 4 – по энергии прорастания: люцерна, сорт Селена; рапс, сорта Ратник и Антарес; клевер, сорт Павловский; по всхожести: у люцерны, сорт Селена).

Группа 1. Максимальная прибавка от применения ГНК наблюдается в области низких и умеренных концентраций наночастиц по энергии прорастания: редис (сорт Юбилейный), нуг Абиссинский (сорт Липчанин), соя (сорт Алена), фестулолиум (сорт Аллегро) – рис.2, по всхожести: свекла сахарная (сорт Смена), фестулолиум (сорт Аллегро), соя (сорт Алена) – рис.3.

Группа 2. Максимальная прибавка от применения ГНК преимущественно в диапазоне высоких и умеренно высоких концентраций наночастиц по энергии прорастания: свекла столовая

The germinating ability of the original seeds used in the experiment (control) ranged from 51.4% (clover, variety Mars) to 98.1% (radish, variety Yubileiny) for different crops; the germinative energy varied in a much wider range (Table 1). All data presented in section "Results and their discussion" are compared with the indicated controls in relative units (in %).

RESULTS AND THEIR DISCUSSION

The use of nanosized silica during seed germination in the experiment made it possible to increase the seed germinative energy by a maximum of 10.5% in comparison with

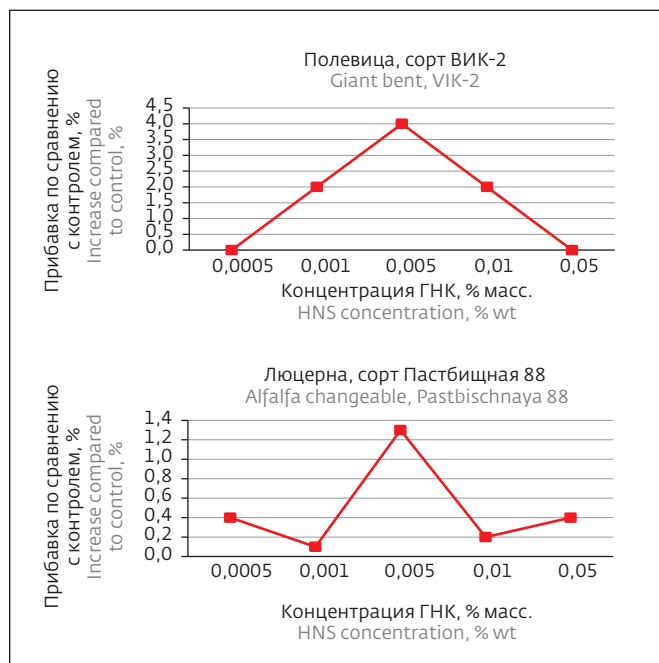


Рис.7. Влияние концентрации ГНК на всхожесть семян полевицы и люцерны
Fig.7. Influence of HNS concentration on the germinating ability of bent and alfalfa seeds

(сорт Деметра), кориандр (сорт Янтарь) – рис.4, по всхожести: свекла столовая (сорт Деметра), овсяница (сорт Кварта) – рис.5.

Группа 3. Максимальная прибавка наблюдается преимущественно в области средних концентраций ГНК (типичные примеры по энергии

the control (soybean, Alena variety). At the same time, for a number of crops, the increase in seed germinative energy did not exceed 1% (rapeseed, varieties Antares and Ratnik, alfalfa variety Selena, clover meadow, varieties Mars and Pavlovsky). A small level of increased germinating ability is characteristic of all studied rapeseed and clover varieties. At the same time, the increase in the germinating ability of seeds of alfalfa variety Selena was 0.6%, and that of alfalfa variety Pastbishchnaya 88 – 1.2%.

The germinating ability of seeds with the use of HNS increased by a maximum of 8.3% compared to the

control (sugar beet, hybrid Smena F1). However, for the same crops, which showed a minimum increase in seed germinative energy, the increase in germinative ability was also minimal, and did not exceed 1% (rapeseed, varieties Antares and Ratnik, alfalfa, variety Selena, meadow clover, varieties Mars and Pavlovsky). At the same time, the increase in germinative ability of seeds of alfalfa, variety Selena, was 0.4%, and that of alfalfa, variety Pasturenaya 88 – 1.3%. For coriander, variety Yantar, the increase in germination energy was up to a maximum of 5.1%, and the increase in germination rate was up to 0.7%.

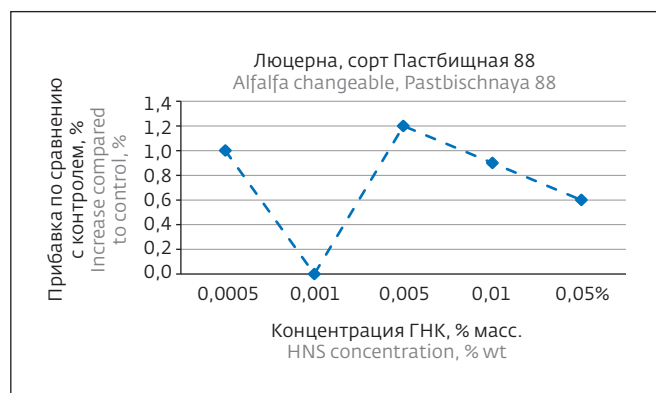


Рис.8. Влияние концентрации ГНК на энергию прорастания семян люцерны Пастбищная 88
Fig.8. Influence of HNS concentration on the germinative energy of alfalfa seeds, Pasture 88 variety

прорастания: свекла сахарная (гибрид Смена F1), овсяница (сорт Кварта), полевица (сорт ВИК-2) – рис.6; по всхожести: полевица (сорт ВИК-2), люцерна (сорт Пастбищная 88) – рис.7.

Группа 4. Характеризуется наличием двух выраженных максимумов и минимумов по энергии прорастания: люцерна (сорт Пастбищная 88) – рис.8; по всхожести: нуг Абиссинский (сорт Липчанин) и редис (сорт Юбилейный) – рис.9.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование гидротермального нанокремнезема влияет на уровень и направленность метаболизма растений, что приводит к изменению

A significant increase in seed germinative energy under the influence of treatment with silica nanoparticles (to a greater extent than germinating ability) in the experiment was also manifested, except coriander, in a number of other crops, especially Abyssinsky nougat, Lipchanin variety, and soybean, Alena variety. At the same time, HNS can stimulate a greater increase in the germinating ability than the germinative energy indicator (for example, sugar beet, hybrid Smena F1, Festulolium, Allegro variety).

Thus, the genetic factor plays a significant role in the formation of

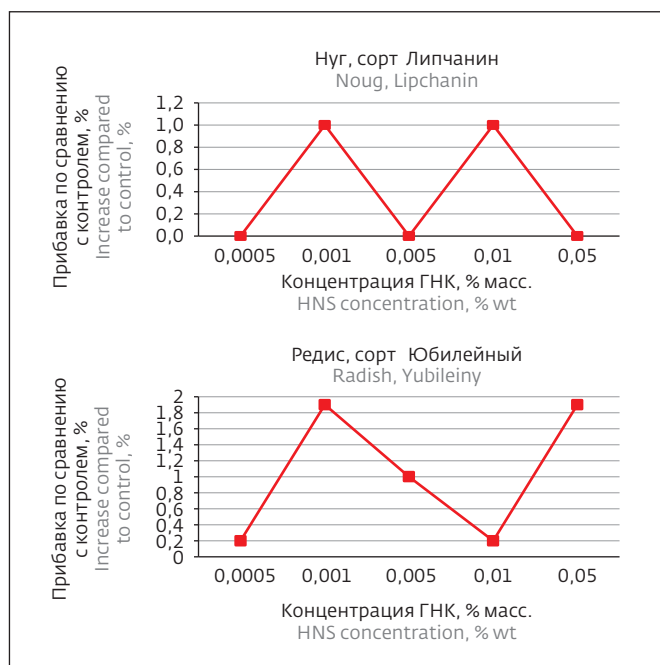


Рис.9. Влияние концентрации ГНК на всхожесть семян нуга Абиссинского (сорт Липчанин) и редиса (сорт Юбилейный)
Fig.9. Influence of HNS concentration on the germinating ability of seeds of Abyssinsky nougat (Lipchanin variety) and radish (Yubileiny variety)

свойств растений. Можно предположить, что механизмы воздействия ГНК на растения будут различаться в разные периоды онтогенеза. В целом вопрос о влиянии нанокремнезема на стадии прорастания семян в настоящее время еще мало разработан. В работе впервые получены экспериментальные

данные по оценке влияния гидротермального нанокремнезема разных концентраций (0,05; 0,01; 0,005; 0,001 и 0,0005%) на прорастание семян 11 (15 генотипов) сельскохозяйственных растений, различающихся по хозяйственному использованию, биологическим свойствам, биохимическому составу и физико-химической структуре семенного материала.

Установлено четыре типа реакции темного прорастания семян на воздействие наночастиц гидротермального кремнезема в диапазоне концентраций от 0,0005 до 0,05%. Данные закономерности характерны как для показателя "энергия прорастания семян", так и для показателя "всхожесть семян", однако они не всегда совпадают для одной и той же культуры. Таким образом, генетический и эпигенетические факторы химического, биохимического и физико-химического и биофизического (структура конкретных семян) состава растений играют существенную роль в формировании отзывчивости конкретных семян растений на воздействие наночастиц кремнезема природного происхождения различных концентраций при предпосевной обработке семян.

Полученные в исследовании данные могут быть полезны для понимания механизмов воздействия наночастиц на этапе прорастания семян для последующего использования в разработке биотехнологий предпосевной обработки семян в растениеводстве открытого и защищенного грунта, а также получения нового вида пищевой продукции – проростков семян и микрозелени.

plant response to the use of hydrothermal nanosilica during seed germination in the dark mode.

Screening of seeds of different crops and varieties according to the reaction of energy and germinating ability indicators to the treatment with HNS of different concentrations (0.05%, 0.01%, 0.005%, 0.001% and 0.0005%) showed existence of several types of such reactions. Figures 2–9 show four generalized groups of crops, differing in the geometric form of the response-display on the graph illustrating dependence of the energy indicator (germinating ability) to the control, depending on the concentration of HNS in

the water sol during presowing seed treatment. Different plants were distributed among groups by visualizing these diagrams reflecting the response forms of the seeds of the corresponding crops. Selected for the analysis were those crops and varieties in which the increase in germinative energy and seed germinating ability, when using HNS, exceeded 1%. We note that the identified four types of reactions can be traced both in the analysis of the germinative energy and germinating ability, however, complete coincidence is not found. This is probably due to the fact that the totality of manifestations of

biochemical (specificity and activity of enzymes), biophysical (structure of the seed), chemical (chemical composition of seed nutrients) and physiological factors (features of germination) form the characteristic signs of "germinative energy" and "germinating ability" on the diagrams, which adds significant differences (change the ranking of the significance of factors) along with the specificity of genomes. However, in crops with an increase in indicators of the germinating ability and germinative energy of less than 1%, similar tendencies were observed in the type of response-reaction

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCE

1. **Потапов V.V., Fediuk R.S., Gorev D.S.** Obtaining sols, gels and mesoporous nanopowders of hydrothermal nanosilica // *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2020. V. 94. PP. 681-694. <https://doi.org/10.1007/s10971-020-05216-z>.
2. **Потапов V.V., Fediuk R.S., Gorev D.S.** Hydrothermal SiO₂ Nanopowders: Obtaining Them and Their Characteristics // *Nanomaterials*. 2020. V. 10(4), 624. PP. 1-28. <https://doi.org/10.3390/nano10040624>.
3. **Потапов V.V., Fediuk R.S., Gorev D.S.** Membrane concentration of hydrothermal SiO₂ nanoparticles // *Separation and Purification Technology*. 2020. 251. 117290. PP. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117290>.
4. **Потапов В., Сивашенко В., Зеленков В.** Нанодисперсный диоксид кремния: растениеводство и ветеринария // *НАНОИНДУСТРИЯ*. 2013. Т. 42. № 4. С. 18-25.
5. **Зеленков В.Н., Потапов В.В.** Гидротермальный нанокремнезем в сельскохозяйственном растениеводстве и биотехнологии // *НАНОИНДУСТРИЯ*. 2020. Т. 13. № 1(94). С. 22-33. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.1.22.33>.
6. **Зеленков В.Н., Латушкин В.В., Елисеєва Л.Г., Леонова И.Б., Потапов В.В., Иванова М.И., Верник П.А.** Гидротермальный нанокремнезем в получении экологически чистой салатной продукции с заданными свойствами в условиях закрытой агробιοтехносистемы // *НАНОИНДУСТРИЯ*. 2020. Т. 13. № 3-4(97). С. 206-220. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.3-4.206.220>.
7. **Алексеева К.Л., Зеленков В.Н., Потапов В.В., Бекузарова С.А., Иванова М.И.** Способ борьбы с мучнистой росой томатов в теплицах. Патент на изобретение № 2646058. Опубликовано: 01.03.2018. Бюл. № 7. Приоритет изобретения 06.07.2016 г. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 01.03.2018 г. – М.: Роспатент.
8. **Потапов В.В., Сивашенко В.А., Зеленков В.Н., Пичужкин И.С., Бекузарова С.А.** Способ использования гидротермального нанокремнезема в качестве кормовой добавки. Патент на изобретение № 2638322. Опубликовано: 13.12.2017. Бюл. № 35. Приоритет изобретения 08.12.2016 г. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 13.12.2017 г. – М.: Роспатент.
9. **Потапов В.В., Сивашенко В.А., Зеленков В.Н., Бекузарова С.А.** Способ использования аморфного гидротермального нанокремнезема в птицеводстве. Патент на изобретение № 2655739. Приоритет изобретения 05.06.2017 г. Опубликовано: 29.05.2018. Бюл. № 16. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 29.05.2018 г. – М.: Роспатент.
10. **Зеленков В.Н., Петриченко В.Н., Потапов В.В., Иванова М.И., Верник П.А., Латушкин В.В., Новиков В.Б., Поверина Н.В.** Способ использования гидротермального нанокремнезема для получения экологически чистой

(according to the type of group 1 in germination – in rapeseed, variety Antares, in group 2 – in germination – in rape, variety Ratnik, clover, variety Mars, coriander, variety Yantar, groups 3 – by germination energy – clover, variety Mars, by germination – by clover, variety Pavlovsky, group 4 – by germination energy – alfalfa, variety Selena, rape, variety Ratnik and rape, variety Antares, clover, Pavlovsky variety, by germination rate – in alfalfa, Selena variety).

Group 1. The maximum increase after use of HNS is observed in the area of low and moderate concentrations of nanoparticles in terms

of germinative energy: radish (Yubileiny variety), Abyssinsky nougat (Lipchanin variety), soybean (Alena variety), festulolium (Allegro variety) – Fig.2, according to the germinating ability: sugar beet (hybrid Smena F1), festulolium (Allegro variety), soybean (Alena variety) – Fig.3.

Group 2. The maximum increase after use of HNS mainly in the range of high and moderately high concentrations of nanoparticles in terms of germinative energy: table beet (Demetra variety), coriander (Yantar variety) – Fig.4, according to the germinating ability: table beet (Demetra variety), fescue (Kvart variety) – Fig.5.

Group 3. The maximum increase is observed mainly in the area of average concentrations of HNS (typical examples of germinative energy: sugar beet (hybrid Smena F1), fescue (Kvart variety), bent grass (VIK-2 variety) – Fig.6. according to the germinating ability: bent VIC-2), alfalfa (Pasture 88 variety) – Fig.7.

Group 4. It is characterized by the presence of two pronounced maxima and minima of the germinative energy – alfalfa (Pastbishnaya 88 variety) – Fig.8, according to the germinating ability – Abyssinsky nougat (Lipchanin variety) and radish (Yubileiny variety) – Fig.9.



- продукции салата в замкнутых агробиотехносистемах. Патент на изобретение № 2701495. Опубликовано: 26.09.2019. Бюл. № 27. Приоритет изобретения 11.12.2018 г. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 26.09.2019 г. – М.: Роспатент.
11. **Lapin A.A., Kalayda M.L., Potapov V.V., Zelenkov V.N., Voropaeva N.L.** The influence of hydrothermal nanosilica powder aquaspersions on the vital capacity of *Daphnia magna* Straus crustaceans / *Int. J. Nanotechnol.*, v. 15, no. 4/5, 2018, pp. 422–432.
 12. **Lapin A.A., Kalayda M.L., Potapov V.V., Zelenkov V.N.** Prospects for the Nanosilica Powder Aquaspersions in Feed for Fish. – *Innovations in Chemical Physics and Mesoscopy*. – in Book "Nanoscience and Nanoengineering. Novel Application. – Toronto-New Jersey: AAP, 2019. 355 p. – PP. 283–294. <https://doi.org/10.1201/9781351138789>.
 13. **Зеленков В.Н., Латушкин В.В., Потапов В.В., Иванова М.И., Верник П.А.** Влияние гидротермального нанокремнезема на проращивание семян пшеницы в темновом режиме как один из методических аспектов биотехнологии получения функциональных продуктов на основе микрозелени // *НАНОИНДУСТРИЯ*, 2020. Т. 13. № 5(98). С. 284–297. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.5.284.297>.
 14. Жизненный цикл и экология растений: регуляция и управление средой обитания в агробиотехносистемах // Сб. науч. тр. Вып. 1. / Под ред. проф. В.Н.Зеленкова. – М.: ТЕХНОСФЕРА, АНО "Институт стратегий развития", 2018. 208 с. ISBN 978-5-94836-543-5.
 15. **Manzer H.S., Mohamed H.A., Mohammad F., and Mutahhar Y.A.** Role of Nanoparticles in Plants. In book: *Nanotechnology and Plant Sciences*. Springer International Publishing Switzerland. 2015. PP. 19–35.
 16. **Siddiqui M.H., Al-Whaibi M.H.** (2014) Role of nano-SiO₂ in germination of tomato (*Lycopersicon esculentum* seeds Mill.). *Saudi Biol Sci* 21:13–17.
 17. **Suriyaprabha R., Karunakaran G., Yuvakkumar R., Rajendran V., Kannan N.** (2012) Silica nanoparticles for increased silica availability in maize (*Zea mays* L) seeds under hydroponic conditions.
 18. **Bao-Shan L., Shao-Qi D., Chun-Hui L., Li-Jun F., Shu-Chun Q., Min Y.** (2004) Effect of TMS (nanostructured silicon dioxide) on growth of Changbai larch seedlings. *J Forest Res* 15:138–140.
 19. **Shah V., Belozeroва I.** (2009) Influence of metal nanoparticles on the soil microbial community and germination of lettuce seeds. *Water Air Soil Pollut* 197:143–148.
 20. **Lu C.M., Zhang C.Y., Wen J.Q., Wu G.R., Tao M.X.** (2002) Research on the effect of nanometer materials on germination and growth enhancement of Glycine max and its mechanism. *Soybean Sci* 21:68–172.
 21. **Wang A., Zheng Y., Peng F.** (2014) Thickness-controllable silica coating of CdTe QD's by reverse Microemulsion method for the application in the growth of rice. *J. Spectrosc.* <http://dx.doi.org/10.1155/2014/169245>.

CONCLUSIONS

The use of hydrothermal nanosilica affects the level and direction of plant metabolism, which leads to a change in plant properties. It can be assumed that the mechanisms of the HNS effect on plants will differ in different periods of ontogenesis. In general, the question of the effect of nanosilica on the stage of seed germination is still poorly developed. In this work, for the first time, experimental data were obtained on assessing the effect of hydrothermal nanosilica of different concentrations (0.05%, 0.01%, 0.005%, 0.001% and 0.0005%) on seed germination of 11 (15 genotypes)

agricultural plants differing in economic use, biological properties, biochemical composition and physicochemical structure of the seed.

Four types of reaction of dark germination of seeds to the effect of hydrothermal silica nanoparticles in the concentration range from 0.0005% to 0.05% have been established. These patterns are typical for both the "seed germinative energy" and "seed germinating ability" indicator, but they do not always coincide for the same crop. Thus, the genetic and epigenetic factors of the chemical, biochemical and physicochemical and biophysical (structure of specific seeds) plant composition

play a significant role in the formation of the response of specific plant seeds to the effect of natural silica nanoparticles of various concentrations during pre-sowing seed treatment.

The data obtained in the study can be useful for understanding the mechanisms of the effect of nanoparticles at the stage of seed germination, as well as for subsequent use for the development of biotechnologies for pre-sowing seed treatment in the open and protected ground crop production, as well as for obtaining a new type of food products – seed sprouts and microgreens. ■



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Гибридные наночастицы биоактивных и лекарственных веществ

Под ред. М.Я. Мельникова,
Л.И. Трахтенберга

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. – 408 с.
ISBN 978-5-94836-596-1

Цена 1300 руб.

В учебном пособии, состоящем из введения и 11 глав, обобщены результаты исследований, посвященных различным аспектам биоактивных и лекарственных наноконструктивных систем. Большое внимание уделено особенностям синтеза и тому новому, что дает наноразмер объектов в протекании в них различных физико-химических процессов. Кроме того, сделана попытка систематизировать методы синтеза, приводящие к получению соединений различного класса. Подчеркивается, что эффективность лекарственных веществ и их фармакологические свойства во многом зависят от кристаллической структуры, в частности от присутствия тех или иных полиморфных модификаций или аморфного состояния. Первоочередное значение имеет размер наночастиц, так как малым частицам проще преодолевать защитные барьеры организма человека и животных, проникать в клетки и накапливаться в тканях.

Все главы написаны группами научных сотрудников, активно работающих в разных областях нанобиомедицины. Наряду с обзорным материалом, излагаются и оригинальные исследования авторов, обобщающие их работы за несколько последних лет. Предлагаемая книга будет полезным учебным и учебно-научным пособием для читателей широкого круга интересов от студентов и аспирантов до преподавателей и научных сотрудников, интересующихся различными аспектами теории и практики наноразмерных биоактивных и лекарственных веществ.

Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91
По факсу: (495) 956-33-46
E-mail: knigi@technosphera.ru
sales@technosphera.ru

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ
www.technosphera.ru